Bestimmung der Reichweite von Kathodenstrahlen von 35—60 Kilovolt in Luft nach der Wilsonschen Nebelmethode

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
genehmigt von der Philosophischen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

Alfred Thomescheit
aus Berlin-Charlottenburg

Tag der Promotion: 13. Dezember 1933
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 1933

1 9 3 3

Johann Ambrosius Barth in Leipzig

90

Referenten: Prof. Dr. A. Wehnelt
Prof. Dr. W. Nernst

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderdruck aus „Annalen der Physik"
5. Folge, Band 18, Heft 7. 1933

Printed in Germany

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig 235

Einleitung

Über die Reichweite von Kathodenstrahlen in Luft liegen bereits eine ganze Reihe von Messungen vor. Von Untersuchungen über die Reichweite der β-Strahlung radioaktiver Substanzen in dem in dieser Arbeit untersuchten Geschwindigkeitsgebiet sind besonders die Arbeiten von L. Meitner[1]) und J. Petrová[2]) zu nennen. Wilsonaufnahmen von β-Strahlen etwas geringerer Geschwindigkeit hat E. J. Williams[3]) für Sauerstoff geliefert. Für erheblich langsamere β-Strahlen, deren Reichweite nicht mehr der vierten Potenz ihrer Geschwindigkeit proportional ist, fand die Wilsonmethode kürzlich bei T. Alper[4]) Verwendung.

Von Röntgenstrahlung ausgelöste Sekundärelektronen in uns interessierenden Geschwindigkeitsgebieten untersuchten auf ihre Reichweite C. T. Wilson[5]) und A. H. Compton und A. W. Simon[6]) für Luft, J. M. Nuttall und E. J. Williams[7]) für Stickstoff und Sauerstoff, die Hauptbestandteile der Luft, und schließlich F. Kirchner[8]) für Argon, dessen Molekulargewicht dem mittleren Molekulargewicht der Luft noch nahesteht.

---

1) Lise Meitner, Naturwissensch. **14**. S. 1199—1203. 1926.
2) J. Petrová, Ztschr. f. Phys. **55**. S. 628—645. 1929.
3) E. J. Williams, Proc. Roy. Soc. London (A) **130**. S. 310—327. 1931.
4) T. Alper, Ztschr. f. Phys. **76**. S. 172—189. 1932.
5) C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. London (A) **104**. S. 1—24 und 192—212. 1923.
6) A. H. Compton u. A. W. Simon, Phys. Rev. [2] **25**. S. 306 bis 313. 1925.
7) J. M. Nuttall and E. J. Williams, Phil. Mag. [7] **2**. S. 1109 bis 1116. 1926.
8) F. Kirchner, Ann. d. Phys. [4] **83**. 521—534. 1927.

Berechnungen der Reichweite auf Grund von Messungen der totalen Sekundärelektronenzahl und des Ionisierungsvermögens von Kathodenstrahlen in Luft haben H. Kulenkampff[1]) und E. Buchmann[2]) vorgenommen. Mit erheblich kleineren Elektronengeschwindigkeiten als den hier betrachteten befassen sich die Messungen von G. A. Anslow.[3])

Die ältesten Reichweitemessungen an in einem Entladungsrohr beschleunigten Kathodenstrahlen in Luft stammen von P. Lenard[4])[5]) (Grenzdickenbestimmungen). Von späteren Untersuchungen sind die von R. Whiddington[6]), B. F. J. Schonland[7]) und W. Gentner[8]) zu nennen. Die Wilsonsche Nebelmethode hatte bisher noch keine Verwendung zur Untersuchung von Kathodenstrahlen, die direkt durch Hochspannung in einem Entladungsrohr erzeugt wurden, gefunden. Eine solche Untersuchung enthält die hier vorliegende Arbeit für Kathodenstrahlen von etwa 35 bis 60 kV.

Versuchsanordnung

1. Erzeugung der Kathodenstrahlen

Die zur Erzeugung der Kathodenstrahlen nötige Spannung wurde von einer Starkstrominfluenzmaschine geliefert, die bei den untersuchten Spannungen etwa 0,3 mA gab. Die Kathodenstrahlen wurden in einer Aluminiumfensterröhre mit kalter Kathode (Fig. 1) erzeugt. Das Entladungsrohr bestand aus einem in seiner Grundform zylindrischen Glasrohr von 20 cm Länge und 35 mm Außendurchmesser, in dessen eines Ende mittels des Mantelschliffs *A* die Kathode eingeführt war. Der Kathodenteil des Entladungsrohres bestand ganz aus Metall. Der Träger der Kathode war ein zu dem Glasschliff passender Innenschliff *B* aus Messing, der sich nach außen in ein 172 mm langes Messingrohr *C* von 19 mm äußerem Durchmesser fortsetzte, das an seinem Ende durch eine angelötete Messinghohlkugel *D* von 40 mm Durchmesser abgeschlossen war. Die eigentliche Kathode bestand aus einem massiven Aluminium-

---

1) H. Kulenkampff, Ann. d. Phys. [4] **80**. S. 261—278. 1926.
2) E. Buchmann, Ann. d. Phys. [4] **87**. S. 509—535. 1928.
3) G. A. Anslow, Phys. Rev. [2] **25**. S. 484—500. 1925.
4) P. Lenard, Wied. Ann. **51**. S. 225—267. 1894.
5) P. Lenard, Wied. Ann. **56**. S. 255—275. 1895.
6) R. Whiddington, Proc. Roy. Soc. London (A) **86**. S. 360 bis 370. 1912.
7) B. F. J. Schonland, Proc. Roy. Soc. London (A) **108**. S. 187 bis 210. 1925.
8) W. Gentner, Ann. d. Phys. [5] **10**. 223—243. 1931.

zylinder E von 45 mm Länge und kreisförmigem Querschnitt von 30 mm Durchmesser, dessen Vorderseite zur Erzielung möglichst hoher Strahlintensitäten außerhalb des Rohres unter leichter Verrundung der Kante als Hohlspiegel ausgebildet war. Der Aluminiumzylinder hatte von der Unterseite aus eine längere axiale Bohrung, mit welcher er stramm auf einen runden Messingstab F gesteckt war, der durch eine zentrale Bohrung des massiven Messingschliffs und ferner durch eine Führung G im Innern des Messingrohres ging. Um ein Fortschleudern des Aluminiumzylinders durch einen beim Evakuieren entstehenden Überdruck im Messingrohr auszuschließen, war die Vorderfläche des Messingschliffs mit zwei Löchern und die Unterseite des Aluminiumzylinders mit einer mit diesen Löchern in Verbindung stehenden rinnenförmigen Vertiefung versehen.

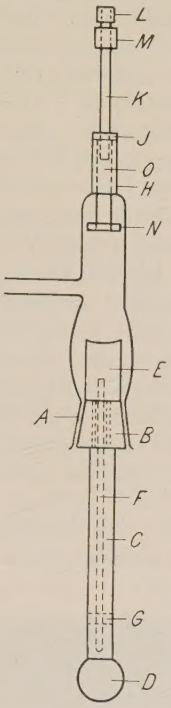

Fig. 1.
Kathodenstrahlrohr

An seinem dem Schliff abgewandten Ende verjüngte sich das Glasrohr und war mit einem Hohlzylinder H aus Kupfer von 20 mm äußerem Durchmesser und 40 mm Länge verschmolzen, dessen äußeres Ende durch einen etwa 5 mm starken Boden J abgeschlossen wurde, der in der Mitte ein rundes Loch von 6 mm Durchmesser hatte. Durch dieses Rohr war ein Kupferrohr K von 4 mm innerem Durchmesser geschoben, das 14 mm weit in den inneren Hohlraum des Kupferzylinders, mit dem es außen weich verlötet war, hineinragte und außen eine Länge von 10 cm hatte. Sein äußerstes Ende war mit einem Außengewinde versehen und trug einen aufgeschraubten Messingzylinder L von 10 mm äußerem Durchmesser, dessen etwa 1 mm starke Endfläche plangeschliffen war und in der Mitte eine 0,3 mm weite runde Durchbohrung hatte, die sich nach innen zu etwas erweiterte. Diese Blende war außen mit einer 7 μ starken runden Aluminiumfolie bedeckt, die am Rande von außen mit Schellack abgedichtet war. Der aufgeschraubte Rohrkopf war von außen mit Picein gedichtet. Dicht hinter ihm saß auf dem Kupferrohr ein zylindrischer Gummipfropfen M, mit welchem das Entladungsrohr luftdicht in die Wilsonkammer eingeführt war.

Der Gummipfropfen bewahrte das Entladungsrohr zugleich vor Beschädigungen durch Erschütterung der Wilsonkammer beim Expandieren.

Da es sich als nötig erwies, die Verschmelzungsstelle des Glases mit dem Kupfer vor dem Kathodenstrahlbombardement zu schützen, wurde eine runde Aluminiumscheibe N von 30 mm Durchmesser im Rohrinneren vor die Einschmelzstelle gesetzt. Die passend durchbohrte Aluminiumscheibe wurde auf das Ende eines 73 mm langen Kupferrohres O von 6 mm innerem Durchmesser geschoben und eine feste Verbindung der beiden Teile durch Drücken auf der Drehbank hergestellt. Mit seinem freien Ende wurde das Kupferrohr auf das innere Ende des mit dem Kupferzylinder verlöteten Kupferrohres gesteckt. Die Aluminiumscheibe bildete die eigentliche Anode; der Abstand der beiden Aluminiumelektroden betrug etwa 8 cm. Die Anode war über ein Milliamperemeter geerdet.

Zur Verminderung der Durchschlagsgefahr war das Glasrohr in der Gegend der Kathode zu einer größten äußeren Weite von 44 mm aufgeblasen. Ein seitliches Ansatzrohr in der Mitte zwischen den beiden Aluminiumelektroden führte zur Pumpanlage.

Um ein Austreten der Kathodenstrahlen durch das Aluminiumfenster zu erreichen, war ein genau axialer Verlauf des langen Kupferrohres und eine genaue Zentrierung der Kathode von größter Wichtigkeit. Waren diese Bedingungen erfüllt, so traten trotz des langen Kupferrohres stets intensive Kathodenstrahlen durch das Lenardfenster aus.

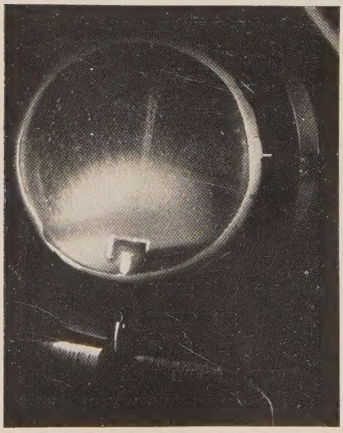

Fig. 2. Beispiel einer Kathodenstrahlaufnahme

Dieser Teil des Entladungsrohres wurde zwischen zwei zur Erzielung eines genügend starken Feldes möglichst nah aneinandergeschobene Magnetspulen von 46 mm äußerem Durchmesser gebracht. Die Spulen hatten einen Weicheisenkern; sie dienten zur Ablenkung der Kathodenstrahlen vor den Expansionen. Das Magnetfeld hatte keinen merklichen Einfluß auf die Spannung am Entladungsrohr. Ferner konnte die im Rohr erzeugte Röntgen-

strahlung durch das lange Rohr nur in einen kleinen räumlichen Winkel austreten (vgl. die beigefügte Aufnahme Fig. 2).

2. Pumpanlage

Die Pumpanlage bestand aus einer rotierenden Ölpumpe als Vorvakuumpumpe und einem Aggregat aus einer Dampfstrahlvakuumpumpe und einer Kondensationspumpe nach Volmer. Zur Fernhaltung der Quecksilberdämpfe vom Entladungsrohr wurde mit flüssiger Luft gekühlt. Zur Druckmessung diente ein Manometer nach McLeod. Seitlich an die Pumpleitung zwischen Pumpaggregat und Entladungsrohr wurde eine absperrbare 5-Liter-Kugel als Ballastvolumen gesetzt. Die Spannung am Entladungsrohr wurde durch Regulierung des Gasdrucks auf die gewünschten Werte gebracht. Hierzu diente ein Vakuumregulierventil (Nadelventil), das an eine Abzweigung der Pumpleitung zwischen Pumpen und Entladungsrohr gesetzt wurde. Da es zur Erzielung des richtigen Drucks ziemlich weit geschlossen werden mußte, verursachte bereits die kleinste mögliche Verstellung der Nadel Spannungsänderungen von der Größenordnung des gesamten untersuchten Spannungsbereichs. Die Spannung am Entladungsrohr hing zudem außerordentlich stark vom Druck ab; dem untersuchten Meßbereich entsprach ein Druckbereich von etwa $1{,}8 \cdot 10^{-2}$ bis $2{,}1 \cdot 10^{-2}$ mm Hg. Daher wurde parallel zum Nadelventil eine Feinverstellung F angebracht, die einer von V. Dolejšek und V. Kunzl[1]) angegebenen Vorrichtung entsprach. Pumpenaggregat, Entladungsrohr (einschließlich der Ausfriertasche), McLeodmanometer, Vakuumregulierventile und Puffervolumen waren jedes durch Hähne gegen die übrigen Teile der Anlage absperrbar. Das Messingrohr des Entladungsrohres lag zu seiner Stützung auf einem quer zu ihm laufenden von zwei Stativen gehaltenen waagrechten langen Glasrohr auf.

Um das Entladungsrohr vor zu hoher Spannung zu bewahren, wurde parallel zu ihm eine Funkenstrecke (A in Fig. 3) aus Messingkugeln von 4 cm Durchmesser gelegt, zwischen denen bei zu hoher Spannung Überschlag erfolgte. Da sich wegen der besonders durch Gasausbrüche im Rohr verursachten unvermeidlichen Spannungsschwankungen eine ständige Kontrolle der Spannung als notwendig erwies, wurde sie durch Spannungsteilung an einem Hochohmwiderstand nach A. Gemant[2]) mit Hilfe eines Braunschen Elektrometers gemessen.

---

1) V. Dolejšek und V. Kunzl, Ztschr. f. Phys. **74**. S. 565—573. 1932.
2) A. Gyemant, Elektrotechn. Ztschr. **49**. S. 534—536. 1928.

Der Spannungsteiler B (Fig. 3) bestand aus einem an einem Hartgummistab befestigten 122 cm langem Glasrohr von 20 mm äußerem Durchmesser, in dessen geschlossene Enden Platindrähte als Stromzuführungen eingeschmolzen waren, und in das ferner in verschiedenen Abständen vom unteren Ende seitlich Platindrähte zur Unterteilung der Spannung eingeschmolzen waren. Durch ein kurzes nach oben umgebogenes seitliches Ansatzrohr am oberen Ende, das durch einen eingeschliffenen Glasstöpsel verschließbar war, wurde es mit einer Widerstandslösung gefüllt, die aus

0,7 g Pikrinsäure
11,5 cm^3 Äthylalkohol abs.
88,5 cm^3 Kohlenstofftetrachlorid

auf 100 cm^3 Lösung bestand. Diese Lösung hatte einen spezifischen Widerstand von $1{,}2 \cdot 10^8$ Ohm. Der Gesamtwiderstand des Spannungsteilers betrug etwa 10^{10} Ohm und damit mehr als das 20fache des Widerstandes im Entladungsrohr bei den hier vorliegenden Versuchsbedingungen. Das untere Ende des Spannungsteilers war mit der Anode, das obere mit der Kathode verbunden. Einer der seitlich eingeschmolzenen Platindrähte war mit dem Zeiger eines Braunschen Elektrometers C verbunden; er unterteilte den Widerstand im Verhältnis 1 : 29,7, wobei 29,7 sich auf den Gesamtwiderstand bezieht. Dieses Widerstandsverhältnis wurde mit Hilfe eines Saitenelektrometers bestimmt. Das Braunsche Elektrometer wurde durch Vergleich mit einem gleichen, geprüften Instrument geeicht.

Zur Vermeidung von Sprühverlusten bestanden alle auf Hochspannung befindlichen Leitungen, soweit nicht Hochspannungskabel verwendet war, aus 19 mm dicken, an ihren Enden durch Kugeln von 40 mm Durchmesser abgeschlossenen blanken Messingrohren.

Sichtbarmachung der Kathodenstrahlen und Ausführung der Versuche

Die benutzte Wilsonkammer entsprach im großen und ganzen einem von L. Meitner und K. Freitag[1]) beschriebenen Modell; wir geben daher hier in der Hauptsache die wichtigeren Abweichungen von diesem Modell sowie ihre wichtigsten Maße und die für den verfolgten Zweck getroffenen besonderen Einrichtungen an.

---

1) Lise Meitner u. K. Freitag, Ztschr. f. Phys. 37. S. 481—517. 1926.

Der Expansionsraum hatte, wenn der Kolben sich in seiner tiefsten Stellung befand, eine Höhe von etwa 6 cm und einen Durchmesser von 14,5 cm. Der 3 cm hohe Glasring und die Spiegelglasplatte, die den obersten Teil der Nebelkammer bildeten, waren durch einen starken Messingring miteinander verbunden, der auf beiden Seiten als Kittfassung ausgebildet war. Der Messingring diente zugleich zur Zuführung der Spannung eines kleinen Hochspannungsgleichrichters, der 1000 Volt lieferte. Der negative Pol war über einen Jodkadmiumwiderstand mit dem Messingring verbunden und lag so an der oberen Gelatineschicht der Wilsonkammer, während der positive Pol und die auf dem Kolben der Nebelkammer befindliche Gelatine geerdet waren. Es wurde mit 500—1000 Volt gearbeitet.

In den Glasring war ein 13 mm weites rundes Loch gebohrt, durch das der Kopf des Entladungsrohres mit Hilfe des oben erwähnten Gummistopfens in den Expansionsraum eingeführt war. Zur Abdichtung des Expansionsraumes gegen den Luftraum unter dem Kolben war der Kolben an seinem unteren Ende mit einer nach oben umgelegten Chromledermanschette versehen, die durch einen Vorschraubring festgehalten und durch ein eingelegtes federndes Stahlband an die Innenwand der Wilsonkammer gepreßt wurde. Ferner war eine Kolbenstange vorhanden, deren unteres Ende durch eine Stopfbüchse hindurch aus der Apparatur herausragte. Das äußere Ende dieser Kolbenstange trug eine hoch und tief verstellbare Muffe, welche einen Anschlag für die Stellung des Kolbens vor der Expansion bildete und eine bequeme Einstellung des gewünschten Expansionsverhältnisses gestattete. Das Hochdrücken des Kolbens nach jeder Expansion erfolgte mittels eines Hebels. Die Expansionen erfolgten durch schnelles Absaugen der Luft unter dem Kolben mit Hilfe eines evakuierten Glasballons bei elektromagnetischer Öffnung eines Ventils. Um den beobachteten starken Einfluß des benutzten Elektromagneten auf die Kathodenstrahlen zu beseitigen, wurde über die Magnetspule ein oben geschlossenes Eisenrohr von 5 mm Wandstärke geschoben, das über das untere Ende der Spule weit hinausragte und auf der eisernen Grundplatte der Apparatur aufstand.

Zur Beleuchtung der Nebelkammer diente eine bis 30 Amp. belastbare Bogenlampe. Das Licht wurde nur im Augenblick der Expansion zugelassen. Die hierzu benutzte Einrichtung bestand aus einer feststehenden rechteckigen Messingplatte, die in gleicher Höhe mit dem Glasring der Nebelkammer einen

38 mm breiten, 15 cm langen rechteckigen Schlitz hatte. Dicht vor ihr bewegte sich eine zweite Messingplatte abwärts, die einen, ebenfalls quer verlaufenden, 25 mm breiten Schlitz hatte. Die feststehende Platte hatte seitlich Führungsleisten für die fallende Platte. Die bewegliche Platte war oberhalb ihres Schlitzes mit einer senkrechten Reihe kleiner Vertiefungen versehen, in deren eine vor der Expansion ein kleiner Eisenstift eingriff, der die Platte so festhielt. Dieser bildete das Ende des Eisenkernes einer Magnetspule, die an der feststehenden Platte angebracht war und im Augenblick der Expansion betätigt wurde, wodurch die Fallplatte freigegeben wurde. Die notwendige Belichtungszeit betrug etwa $^1/_2$ Sek.; sie wurde dadurch erreicht, daß die Fallplatte mit der Kolbenstange eines Messingkölbchens verbunden war, das sich in einer oben und unten geschlossenen 14 cm langen Messingröhre von 10 mm innerem Durchmesser bewegte, die oberhalb der Fallplatte an einem von der feststehenden Platte getragenen Stab hoch und tief verstellbar angebracht war. Der Kolben war durch eine dünne Lederscheibe an seiner Unterseite gedichtet und wurde im Augenblick der Expansion von der fallenden Platte abwärts gezogen, deren Geschwindigkeit durch den nach oben wirkenden Luftdruck auf den Kolben gedämpft wurde. Die Stellung des Messingrohres wurde so gewählt, daß die Hauptwirkung der Dämpfung erst einsetzte, wenn der Schlitz der feststehenden Platte bereits teilweise freigegeben war. Auf diese Weise war es zulässig, den Auslösemagneten erst zu betätigen, wenn sich der Kolben der Nebelkammer in seiner tiefsten Stellung befand. Die Länge der Belichtungszeit konnte durch die Höhe der Stellung der Fallplatte vor der Auslösung reguliert werden. Um ein Zurückfedern der fallenden Platte aus ihrer tiefsten Stellung zu beseitigen, war der Messingzylinder, in dem das Kölbchen lief, an seinem oberen Ende durch eine stramm übergeschobene Kappe verschlossen; zwischen Rohr und Kappe konnten so während der Betätigung des Verschlusses geringe Luftmengen in das Innere des Rohres nachdringen.

Zur Betätigung des Verschlußmagneten und zum Kurzschließen der Ablenkspulen (Fig. 3) wurden beim Expandieren durch den herabgehenden Kolben der Wilsonkammer zwei Kontakte geschlossen. Die an der Kolbenstange befestigte Anschlagmuffe war dazu mit einem Querarm versehen, der zwei gegen ihn und gegeneinander isolierte, in ihm hoch und tief verschiebbare und feststellbare senkrechte Messingstäbchen trug, die so eingestellt wurden, daß sie in der tiefsten Stellung

des Kolbens die beiden Kontakte schlossen. Von diesen beiden Schaltern lag der eine im Stromkreise des Verschlußmagneten, während der andere E parallel zu den hintereinandergeschalteten Ablenkspulen lag, die er in der tiefsten Kolbenstellung kurzschloß, wodurch den Kathodenstrahlen Zutritt zur Expansionskammer gewährt wurde.

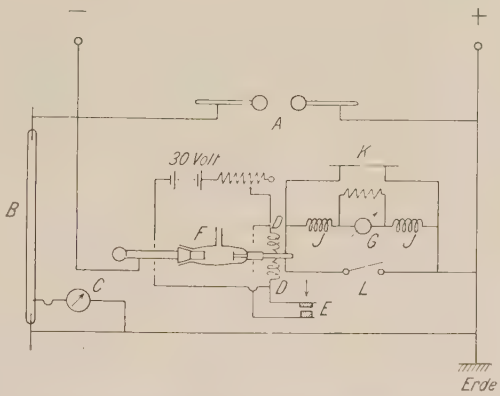

Fig. 3. Schaltung des Kathodenstrahlrohres

Zur Ausführung der Versuche wurde die Hochspannung dauernd an das Entladungsrohr F gelegt. Das neu an die Apparatur gesetzte Rohr mußte stets viele Stunden, oft tagelang durch den Betrieb entgast werden. Ein Konstanthalten der Spannung war auch deshalb besonders schwierig, weil infolge der geringen von der Influenzmaschine gelieferten Stromstärke zur Erreichung genügend hoher Spannungen bei verhältnismäßig kleinen Drucken gearbeitet werden mußte. Bei Spannungen über 65000 Volt setzte die Entladung im Rohr gewöhnlich aus. Zur Messung der Stromstärke im Entladungsrohr diente ein zwischen Anode und Erde gelegtes Türmchengalvanometer G mit geeignetem Nebenschlußwiderstand H. Um das Instrument vor einer Beschädigung durch Schwingungen im Stromkreise der Entladung zu schützen, war vor und hinter dasselbe je eine Drosselspule J gelegt, die aus einer einfachen dichten Lage von 0,1 mm starkem Kupferdraht bestand. Parallel zu dem Instrument einschließlich der Spulen lagen eine Funkenstrecke K aus feinen Nähnadeln, deren Spitzen einander dicht gegenüberstanden, und zwischen denen bei Schwingungen Fünkchen übergingen, sowie ein Schalter L, mit welchem diese Strommeßanlage bei Nichtgebrauch kurzgeschlossen werden konnte.

Da die vom Entladungsrohr erzeugte Röntgenstrahlung bei dauerndem Zutritt zur Nebelkammer beim Expandieren, besonders bei den niedrigeren Rohrspannungen, einen dichten Nebel erzeugte, wurde in etwa 6 mm Abstand vom Lenard-

fenster auf dem Kolben ein 1,5 mm dicker Bleischirm angebracht, der nach dem Rohr hin umgebogene Seitenflächen hatte. In der tiefsten Stellung des Kolbens lag seine obere Kante etwa 2 mm tiefer als die Blende des Entladungsrohres. Außerdem war das Entladungsrohr noch in einen großen nur an der Kathodenseite offenen Bleikasten eingebaut.

Zur bequemen Feststellung des Expansionsverhältnisses (Verhältnis von Anfangsdruck p_1 zu Enddruck p_2 nach Wiederherstellung der Anfangstemperatur) diente eine graphische Darstellung, in der auf der Abszissenachse die Werte von p_1, auf der Ordinatenachse die Werte von p_2 aufgetragen waren, und in der in geeigneten Abständen die Geraden $p_1 : p_2 = \text{const}$ gezeichnet waren.

Die Aufnahmen wurden mit Zeiß-Tessar 1 : 4,5 und einer Brennweite von 9 cm auf Perutz-Persenso-Platten gemacht und kräftig entwickelt. Das lineare Verkleinerungsverhältnis betrug 1 : 4.

Meßergebnisse

Die auf den Negativen erhaltenen Bilder des Nebelfächers (vgl. Fig. 2, S. 794) zeigen an ihren Enden, entsprechend den Enden der Elektronenbahnen, keine völlig scharfe Begrenzung, eine Erscheinung, die besonders bei den niedrigeren Spannungen noch durch die Nebelspuren der von den Röntgenstrahlen ausgelösten Elektronen verstärkt wird. Zur Bestimmung der Reichweite der Kathodenstrahlen wurden daher die Bilder des Nebelfächers auf den Negativen vom Lenardfenster

Tabelle 1

Nummer der Platte	Länge des Fächerbildes auf der Platte in mm; λ = Mittelwert										λ
1	5,8	6,4	6,1	5,9	6,0	6,4	5,8	6,1	5,9	6,1	6,05
2	8,2	8,5	8,5	8,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,4	8,5	8,41
3	9,2	9,6	9,3	9,3	9,6	9,0	9,5	9,3	9,6	9,6	9,40
4	9,7	9,5	9,5	9,4	9,2	9,2	9,4	9,6	9,6	9,9	9,50
5	9,5	9,6	9,6	9,7	9,9	9,8	9,6	9,5	9,7	9,6	9,65
6	11,6	11,4	11,7	11,6	11,6	11,7	11,7	11,5	11,9	11,5	11,62
7	11,15	10,8	11,3	11,15	11,3	11,0	11,4	11,3	11,4	11,3	11,21
8	10,4	10,3	10,8	10,5	10,5	10,4	10,5	10,3	10,7	10,5	10,49
9	11,0	10,8	10,8	10,9	11,1	10,8	11,0	11,2	10,9	10,9	10,94
10	12,2	12,4	12,3	12,0	12,2	11,8	12,2	12,1	12,2	12,1	12,15
11	13,4	13,0	13,0	12,9	13,5	13,1	12,8	12,9	13,0	13,3	13,09
12	12,5	12,5	12,8	12,6	12,8	12,7	13,0	13,0	12,6	13,1	12,76
13	13,8	13,7	13,8	13,5	13,7	13,8	13,8	13,5	13,6	13,9	13,71
14	16,6	17,0	16,6	16,8	16,6	16,7	16,5	17,0	16,6	16,5	16,69
15	16,0	16,4	16,4	16,2	16,1	16,2	15,8	15,8	16,0	16,0	16,09
16	18,1	19,0	19,0	18,5	18,4	18,1	19,0	19,0	18,6	18,2	18,59
17	18,2	17,6	18,0	17,8	18,0	17,8	17,9	17,9	18,2	18,2	17,96

bis zu der Zone des Fächers, wo die Schwärzung mit zunehmender Entfernung vom Lenardrohr am steilsten abfiel, ausgemessen, und zwar für jede Platte 10mal. Die Ergebnisse der Ausmessung und die Mittelwerte sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Die Ausmessung geschah mit Hilfe einer guten Schublehre zwischen deren Spitzen. Die Platten wurden dabei von unten mit zerstreutem Licht beleuchtet und schräg von oben betrachtet.

Tabelle 2

Nummer der Platte	V	p_1	p_2	p	λ	l	$V:\sqrt{l:10}$
1	36 600	767	580	519	6,05	15,1	29 800
2	40 400	772	584	524	8,41	21,2	27 800
3	41 900	725	560	505	9,40	22,9	27 700
4	44 400	767	580	519	9,50	23,8	28 800
5	44 800	760	575	515	9,65	23,9	29 000
6	46 400	726	561	506	11,62	28,3	27 600
7	46 400	760	575	515	11,21	27,9	27 800
8	49 100	726	561	506	10,49	25,6	30 700
9	49 100	768	581	520	10,94	27,4	29 700
10	50 500	734	564	508	12,15	29,8	29 200
11	52 100	725	560	505	13,09	31,8	29 200
12	52 100	760	575	515	12,76	31,7	29 300
13	52 100	767	580	519	13,71	34,3	28 100
14	57 300	760	575	515	16,69	41,4	28 200
15	57 300	766	580	520	16,09	40,4	28 500
16	60 100	767	580	519	18,59	46,5	27 900
17	62 000	738	573	517	17,96	44,8	29 300

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der Untersuchung zusammengestellt. V ist die Voltgeschwindigkeit der Kathodenstrahlen, bereits vermindert um den durch das 7 μ-Aluminiumfenster verursachten Geschwindigkeitsverlust; dieser betrug je nach der Spannung 200—850 Volt. Die zur Berechnung dieses Verlustes benutzten Werte sind einer Arbeit von A. Becker[1]), aus Fig. 3, entnommen. p_1 ist der Druck vor der Expansion, in mm Hg, p_2 der Druck nach der Expansion und Wiederherstellung der Anfangstemperatur. p ist der aus p_1 und p_2 nach der Gleichung für adiabatische Expansion: $p \cdot v^\gamma = \text{const}$, mit $\gamma = 1{,}4$ berechnete Druck im Augenblick des Strahleneintritts. λ ist, wie in Tab. 1, die mittlere Länge des Nebelfächerbildes auf der Platte in Millimeter, umgerechnet auf 0° C. und Normaldruck. Die Aufnahmen sind bei einer Anfangstemperatur von 25° C. gemacht. Aus der letzten Spalte schließlich ersieht man, daß die durchstrahlte Schichtdicke — man

1) A. Becker, Ann. d. Phys. [4] **81**. S. 91—108. 1926.

könnte sie vielleicht zum Unterschied von den gekrümmten Elektronenwegen, den „wahren Reichweiten", als „gerade Reichweite" bezeichnen — dem Quadrat der Voltgeschwindigkeit proportional ist, in Übereinstimmung mit der bisherigen Kenntnis.

Die Werte der letzten Spalte geben also die zu einer geraden Reichweite von 1 cm gehörige Voltgeschwindigkeit an; sie beträgt im Mittel 28700 Volt. Der mittlere Fehler der Einzelbeobachtung beträgt $\pm 3{,}1\,\%$. Ist X die gerade Reichweite und V die Voltgeschwindigkeit der Kathodenstrahlen, so gilt also in dem hier untersuchten Geschwindigkeitsbereich die Beziehung:

$$V = 28700\sqrt{X}\,. \tag{1}$$

Vergleich des gefundenen Ergebnisses mit der bisherigen Kenntnis

Um unser Ergebnis auch mit denjenigen Arbeiten vergleichen zu können, die sich mit der Ermittlung der wahren Reichweite R von Elektronenstrahlen befassen, müssen wir in unserer Gleichung X durch R ausdrücken. Es ist dabei $R = B \cdot X$, wobei B der mittlere Umwegfaktor ist. Wir erhalten so die Beziehung

$$V = 21400\sqrt{R}, \tag{2}$$

wenn wir für B den Wert 1,8 benutzen.

Dieser Wert für B ist entnommen aus P. Lenard.[1]) An Hand der dortigen Angaben wurde dabei folgendes berücksichtigt: Luft hat praktisch den gleichen Umwegfaktor wie Aluminium, da das mittlere Molekulargewicht von Luft und das Molekulargewicht von Aluminium fast gleich sind; es konnten daher die über B für Aluminium gemachten Angaben auf Luft übertragen werden. Ferner: für eine Strahlgeschwindigkeit von 0,35 Lichtgeschwindigkeit, also 34300 Volt, ergeben sich nach S. 233, Tab. 17 für Aluminium die Werte:

Umwegfaktor B bei „Normallauf" der einfallenden Strahlung: $B = 1{,}8$.

Umwegfaktor B' bei „Parallellauf" der einfallenden Strahlung: $B' = 1{,}6$.

Dabei ist noch zu beachten, daß B so wenig von der Strahlgeschwindigkeit abhängt, daß noch für 0,92 Lichtgeschwindigkeit, entsprechend 792000 Volt, $B = 1{,}6$ gilt.

Wenn nun auch nicht behauptet werden soll, daß bei unseren Versuchen bei den Kathodenstrahlen nach dem Austritt

1) P. Lenard, Quantitatives über Kathodenstrahlen aller Geschwindigkeiten. Neuherausgabe, Heidelberg, Carl Winters Buchhandlung, 1925.

durch das 7 μ-Aluminiumfenster „Normallauf“ vorlag, so ist doch dem Artikel von W. Bothe im Handbuch der Physik, Bd. 24, Kap. 1, Nr. 8 zu entnehmen, daß sogar für schnelle β-Strahlen beim Durchgang durch Aluminium bei Schichtdicken oberhalb 7 μ mit Sicherheit „Vielfachstreuung“ zu erwarten ist, was also für unsere langsameren Kathodenstrahlen erst recht zutreffen muß. Die Verwendung des Wertes $B = 1{,}8$ für unsern Zweck erscheint daher gerechtfertigt, um so mehr, als der Unterschied zwischen B und B' ohnehin nicht allzu groß ist.

Ein Vergleich unserer Gl. (1) und (2) mit bisherigen Arbeiten ergibt folgendes (näheres über die angeführten Arbeiten vgl. die Einleitung):

Für die zur Erzeugung von 1 cm wahrer Reichweite in Luft erforderliche Spannung findet J. Petrová[1]) rund 27000 Volt. Aus einer Arbeit von E. J. Williams[2]) ergibt sich bei Umrechnung von Sauerstoff auf Luft hierfür 23100 Volt. C. T. R. Wilson[3]) fand für Luft 21000 Volt. Die Ergebnisse von A. H. Compton und A. W. Simon[4]) für Luft ergeben bei Umrechnung auf Volt mittels der Einsteinschen photoelektrischen Gleichung 21500 Volt. Bei einer Arbeit von J. M. Nuttall und E. J. Williams[5]) ergibt die Umrechnung der Ergebnisse von Stickstoff und Sauerstoff auf Luft 22500 Volt. Die Berechnungen von E. Buchmann[6]) für Luft ergeben 23700 Volt. Eine ungefähre Bestätigung von C. T. R. Wilsons[3]) Wert hat für höhere Spannung W. Gentner[7]) gefunden.

Von Messungen, die gleich den unseren den gekrümmten Verlauf der Strahlen nicht erfassen, sind die von R. Whiddington[8]) und B. F. J. Schonland[9]) zu beachten. Die Messungen von Whiddington beziehen sich jedoch auf die sogenannte „praktische Reichweite“[10]) und können daher nicht zum Vergleich herangezogen werden. Schonland findet einen reichlich kleinen Zahlenwert; die möglichen Ursachen hiervon sind von H. Kulenkampff[11]) erörtert worden.

Von den genannten Messungen stehen den unseren am

---

1) J. Petrová, a. a. O.
2) E. J. Williams, a. a. O.
3) C. T. R. Wilson, a. a. O.
4) A. H. Compton u. A. W. Simon, a. a. O.
5) J. M. Nuttall u. E. J. Williams, a. a. O.
6) E. Buchmann, a. a. O.
7) W. Gentner, a. a. O.
8) R. Whiddington, a. a. O.
9) B. F. J. Schonland, a. a. O.
10) Vgl. Handbuch der Physik, Bd. 24, Kap. 1, Nr. 19.
11) H. Kulenkampff, a. a. O.

nächsten im Ergebnis die von C. T. R. Wilson und die von A. H. Compton und A. W. Simon; beide sind direkt in Luft ausgeführt.

Zum Schluß vergleichen wir unser Ergebnis noch mit einer theoretischen Berechnung durch H. Bethe.[1]) Bethe findet die Formel

$$\frac{\varrho Z}{A} \cdot b = \frac{v_0^4 - v^4}{x},$$

wo ϱ die Dichte, Z die Kernladungszahl, A das Atomgewicht des bremsenden Materials, $b = 14{,}10^{42}$ für eine Strahlgeschwindigkeit $v_0 = 10^{10}$ cm · sec^{-1} und v die Geschwindigkeit nach Durchlaufen der Schichtdicke x ist. Aus Bethes Formel ergibt sich:

$$V = 29350\sqrt{X}, \qquad V = 21850\sqrt{R},$$

während ich gefunden habe:

$$V = 28700\sqrt{X}, \qquad V = 21400\sqrt{R}.$$

Dieser Vergleich ist unabhängig von etwaigen Fehlern durch den Umwegfaktor B.

Zusammenfassung der Resultate

Es wird die Reichweite von in einem Lenardrohr erzeugten Kathodenstrahlen von 35—60 Kilovolt in Luft aus Wilsonaufnahmen bestimmt; sie ergibt sich übereinstimmend mit der bisherigen Kenntnis als proportional der vierten Potenz der Strahlgeschwindigkeit. Die zur Durchstrahlung von 1 cm Schichtdicke in Normalluft erforderliche Spannung ergibt sich zu 28700 Volt. Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit der bisherigen Erfahrung ergibt gute Übereinstimmung.

Herrn Prof. Dr. A. Wehnelt, auf dessen Anregung und unter dessen Leitung diese Arbeit ausgeführt wurde, bin ich für die freundliche Unterstützung meiner Versuche und seinen wertvollen Rat zu großem Dank verpflichtet. Allen Herren, Firmen und Institutionen, die mich durch Ratschläge oder Überlassung von Apparaten usw. unterstützten, so u. a. der Jagorstiftung, der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und Herrn Dir. Dr. Mey von den Osramwerken, bin ich aufrichtig dankbar.

1) H. Bethe, Ann. d. Phys. [5] **5**. S. 325—400. 1930.

Lebenslauf

Ich, Alfred Thomescheit, wurde am 6. Mai 1907 als Sohn des damaligen Stadtsekretärs Richard Thomescheit und seiner Ehefrau Hedwig geb. Brenker in Berlin-Charlottenburg geboren. Ich bin evangelischer Konfession. Von Ostern 1913 bis Ostern 1916 besuchte ich die Vorschule des Gymnasiums in Berlin-Zehlendorf, von Ostern 1916 bis Ostern 1925 dieses Gymnasium, wo ich die Reifeprüfung bestand. Ostern 1925 wurde ich an der Universität Berlin zum Studium der Fächer Physik, Chemie, Mathematik und Philosophie immatrikuliert. An meiner Dissertation habe ich im Physikalischen Institut der Universität unter Leitung von Herrn Professor Dr. A. Wehnelt gearbeitet. Die Promotionsprüfung bestand ich am 20 Juli 1933 bei den Herren Professoren Bodenstein, W. Köhler, Planck und Wehnelt.